

变频驱动液压电梯系统能耗特性*

徐 兵 张 斌 林建杰

(浙江大学流体传动及控制国家重点实验室 杭州 310027)

摘要：阐明了应用变频驱动技术是液压电梯的重要发展方向，是解决液压电梯的高能耗问题的有效途径。分析了变频驱动液压电梯节能原理，对变频调速液压动力系统主要环节的功率消耗特性进行了试验研究。与传统的阀控系统作对比，同样工况下，采用变频驱动的液压电梯系统能够提高效率、降低能量消耗，具有显著的节能效果。

在其他液压提升机械中也有广泛的应用前景。

关键词：变频驱动 液压电梯 能耗

中图分类号：TH137

0 前言

如何降低液压电梯的能量消耗及其导致的液压油温升高一直是液压电梯控制系统的主要难题。随着交流电动机的变频调速(Variable voltage variable frequency, VVVF)技术的成熟及其在众多工业领域的广泛应用，这项技术也引起了液压传动领域的一些专家的注意，开始考虑将电动机的变频调速应用于液压动力系统，并最早以液压电梯为应用对象展开研究。因为利用变频调速技术通过改变电动机转速来实现液压动力系统的容积调速，不仅可以使液压电梯获得更优良的无级调速性能，而且可以简化液压回路，减少液压系统的能量损失。

1984 年日本的三菱公司首先对变频调速技术在液压电梯上的应用进行了原理性研究^[1-2]。这在当时的液压容积调速技术原理上是一个突破。其研究的技术方案可归结为：电动机轴转速反馈、轿厢速度直接反馈结合，重点研究应用在液压电梯中的专用逆变器控制技术；轿厢振动抑制控制方法；流量泄漏补偿控制校正、无低速段的电梯轿厢直接停靠层站技术等。

瑞士的 Beringer 公司研究了一种变频和阀控技术相结合液压电梯控制系统^[3]。其技术新点是以高品质的动态双向流量传感器作为反馈元器件来实现闭环控制。电梯的上行过程采用标准变频驱动液压系统控制，而在下降的起始加速段和减速停层段采用比例电磁阀控制，其他阶段仍采用变频驱动液压系统控制。但此技术中的电子比例阀不仅加工工艺复杂，而且对于系统下行回路的最低压力有要求，

限制了任何降低轿厢重量的技术努力。

国内的变频驱动液压技术的研究也一直与液压电梯密不可分，浙江大学流体传动及控制国家重点实验室于 20 世纪 90 年代初就开展了对变频驱动液压电梯控制系统的研究。首先研究了变频-阀控相结合的控制系統^[4]。在此基础上，采用轿厢速度直接反馈方案，在上、下行程都为变频容积调速的全程闭环 VVVF 液压电梯控制系统方面取得技术突破，并针对大闭环变频控制系统存在的惯性大、系统响应慢、死区及非线性问题，对多种智能控制算法在变频驱动液压电梯上的应用进行了研究，获得了良好的控制性能^[5]。为了对变频驱动的液压电梯系统的节能效果进行量化分析，进一步对其进行了能耗特性研究，分析这种系统中各环节的能量消耗、系统的总效率，在能量消耗上与普通的阀控液压电梯的异同点。这为进一步降低变频驱动液压电梯能量消耗的研究奠定了基础，也为日后的液压电梯系统节能的深入研究提供了数据参考。

1 变频驱动液压电梯的节能原理

图 1 是变频驱动液压电梯控制系统原理图。电梯上行工况，变频器从电网输入能量，按照单片机控制器给定的期望转速驱动电动机并带动定量泵转动，泵输出的流量与电动机的转速成正比，并与电梯轿厢速度相匹配，无溢流损失。

普通的阀控液压电梯其电动机以恒转速驱动定量泵转动，输出的液压油流量恒定。电梯轿厢的上行的运行速度通过节流阀调节进入液压缸的液压油流量实现。多余的流量溢流回油箱。由此造成很大的溢流节流损失，这部分溢流节流损失大部分转化为液压油的热能。

* 国家“十五”科技攻关计划(2002BA208B02)和国家自然科学基金(50305032)资助项目。20050924 收到初稿，20060428 收到修改稿

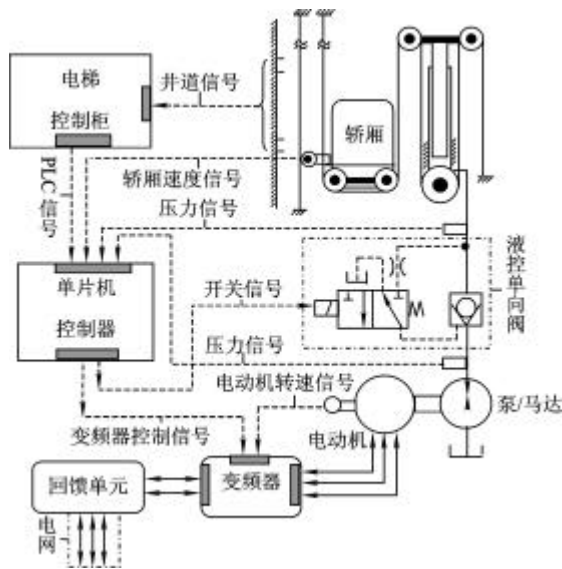


图1 变频驱动液压电梯控制系统原理图

图2、3分别是电梯上行工况下阀控液压电梯和变频驱动液压电梯的能耗示意图。图2、3中的空白面积是各系统的有效能耗，而深色阴影面积是各自系统额外的能量损耗。从图2、3中可以看出，阀控液压电梯在加速段和减速段、平层段的能量损失很大，效率极低，而变频调速液压电梯正好克服了这一缺陷。所以变频调速液压电梯的能量损失比阀控液压电梯小得多。

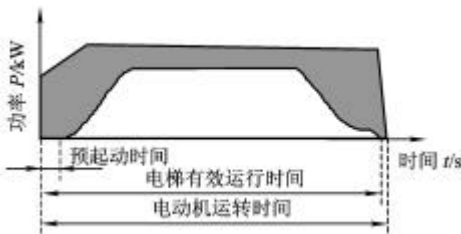


图2 普通节流阀控液压电梯的能耗

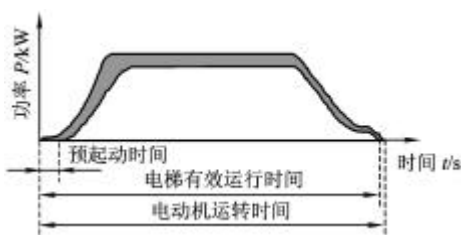


图3 变频驱动液压电梯的能耗

由此可见变频调速液压电梯控制系统的能量输入是“自适应”的，即负载需要多少能量，则电动机输出多少能量；是一种负载压力和流量敏感系统，实际上也就是“功率敏感”系统，国外也有称之为“电液负载敏感”系统。而阀控液压电梯仅仅是负载压力敏感系统，液压泵输出流量是恒定的，因此效率比较低。

对于电梯下行工况，变频驱动液压电梯控制系统无需电网输入能量，是靠电梯轿厢自重下行做功的。但电动机的转速仍由变频器控制，与单片机控制器给定的期望转速相一致，其工作状态为再生发电状态，通过配置的能量回馈单元将这部分能量回馈到电网，达到部分回收电梯轿厢下行势能的目的。对于阀控系统电梯下行过程电动机也不运转，其速度调节一般采用回油路节流调速方案。电梯载重及轿厢自重的势能大部分转化为热能，使液压系统油温升高。

2 系统功率测试及分析

2.1 关键环节的功率参数

相关试验在一台3层3站的液压电梯试验平台上进行，电梯轿厢的额定最大速度为0.5 m/s。通过考察系统主要环节的功率输入、输出特性对系统的能耗特性进行研究。电梯上行工况主要考察能量输入环节——电动机从电网输入的功率；中间环节——液压泵输出功率，能量输出环节——负载所需要的功率。对于下行工况主要考察能量输入环节——负载输出的功率；中间环节——液压马达的输入功率；能量输出环节——回馈到电网的功率。

对于从电网的输入或回馈到电网的有功功率可以直接用钳形功率表测量电源进线静态功率值然后模拟出曲线。其他环节的功率则由计算机控制系统实时采集液压电梯系统的轿厢速度、电动机轴转速和管路内不同位置的液压油压力等关键参数，并按照特定的关系式计算得到。

(1) 电梯上行工况。螺杆泵/马达在“泵”工况的输出功率

$$P_p = p_p (nq_p - Q_{pl}) = p_p \left(nq_p - c_{ps} \frac{q_p}{m} p_p \right) \quad (1)$$

式中 p_p ——螺杆泵/马达的出/入口处液压油压力
 n ——浸油式电动机的实际转速
 q_p ——螺杆泵/马达的额定排量(86 mL/r)
 Q_{pl} ——螺杆泵/马达的内泄漏流量
 c_{ps} ——螺杆泵/马达内泄漏系数(5.1×10^{-8})
 m ——液压油的动力粘度($0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)

上行工况负载需要的功率

$$P_l = m_h g v_h = (p_l A_h - F_f) v_h \quad (2)$$

式中 m_h ——轿厢的综合负载等效到液压缸柱塞上的质量
 g ——重力加速度(9.8 m/s^2)
 v_h ——液压缸柱塞运行速度($0 \sim 0.25 \text{ m/s}$)

- A_h —— 液压缸柱塞受力面积(0.011 3 m²)
- p_1 —— 柱塞缸内液压油压力
- F_f —— 液压缸摩擦副与轿厢摩擦副的摩擦力等效到柱塞上的值, 约为 1 000 N

(2) 电梯下行工况。负载自重输入的功率

$$P_1 = m_h g v_h = (p_1 A_h + F_f) v_h \quad (3)$$

螺杆泵/马达在“马达”工况的输入功率

$$P_p = p_p (nq_p - Q_{pl}) = p_p \left(nq_p - c_{ps} \frac{q_p}{m} p_p \right) \quad (4)$$

2.2 系统功率测试及分析

对变频液压电梯系统在不同负载下、不同楼层间运行的功率进行了测试。限于篇幅, 只给出电梯在电梯轿厢空载和载重质量 250 kg 两种工况下于 1 楼和 2 楼间运行的功率测试曲线。

图 4a、4b 分别是变频液压电梯系统在电梯轿厢空载和轻载(250 kg)工况下的上行功率测试曲线。

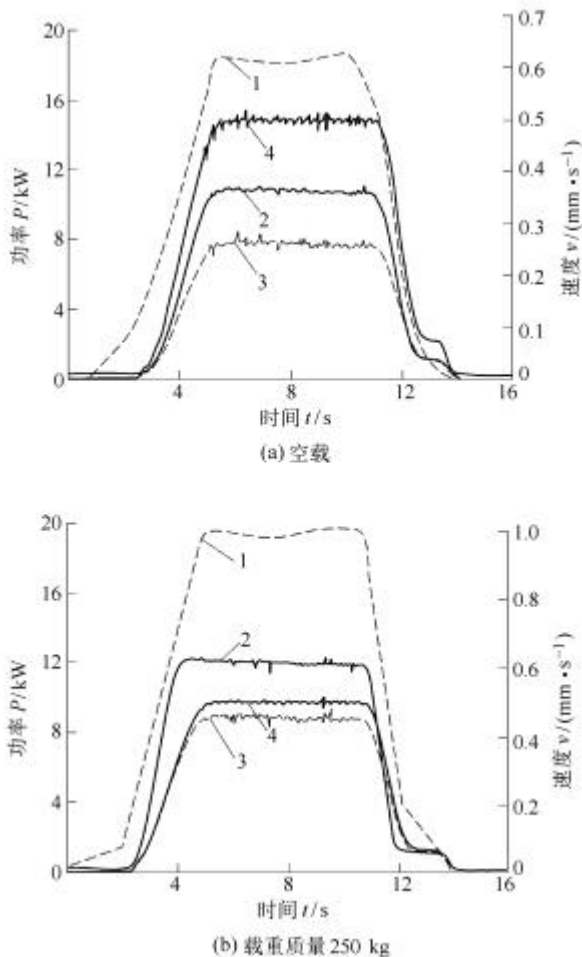


图 4 电梯 1-2 楼运行的功率测试曲线

- 1. 电网输入功率
- 2. 液压泵输出功率
- 3. 负载功率
- 4. 电梯轿厢速度

以图 4a 为例进行系统功率特性说明。单片机控

制器接到电梯上行指令后向变频器发出相应的指令信号, 变频器从电网输入能量驱动电动机启动并低速运转, 此时泵的出口流量很小, 压力远低于柱塞缸内液压油压力, 故不能顶开单向阀。所以电梯速度为零。随着泵出口压力的升高并超过柱塞缸内的综合负载压力, 液压油顶开单向阀使电梯启动。之后变频器按照单片机控制器给定的期望转速驱动电动机转动, 电梯轿厢开始从零速加速到最大速度 0.5 m/s, 期间负载功率从零增加到约 7.8 kW、泵输出功率则增加到 10.8 kW, 电网输入功率则增加到 18.2 kW。在电梯匀速运行阶段, 负载功率、泵输出功率以及电网输入功率基本不变。在电梯减速运行阶段负载功率减至 1.2 kW, 泵输出功率则减至 1.25 kW, 电网输入功率减至 1.4 kW。经过短暂的平层运行阶段(期间各环节功率值基本不变)后, 电梯到达层站位置, 变频器停止从电网输入电能, 电动机停转, 系统中的单向阀在弹簧力及其两端的压力差作用下关闭, 电梯速度降为零, 所以各环节的功率也都变为零。

功率曲线中电网输入功率与液压泵输出功率之差, 实际就是系统变频器到泵之间环节的功率损失。而泵输出功率与负载功率之差则是系统中泵环节到负载之间的功率损失。

电梯整个上行过程中电网输入功率曲线以及泵输出的功率曲线都与负载需要的功率曲线相似, 这正揭示了变频液压系统的“功率敏感”特性。

比较图 4a、4b 可知, 在电梯运行速度不变的情况下, 随着电梯载重质量的增加, 负载功率、泵输出功率及电网输入功率也都有相应程度的增加。

图 5a、5b 分别为变频液压电梯系统在电梯轿厢空载和轻载(250 kg)工况的下行功率测试曲线。在下行工况中, 负载功率相当于整个系统的总输入功率, 而变频器回馈单元回馈到电网的功率相当于系统的最终功率输出。以图 5a 为例进行系统功率特性说明。当液控单向阀开启后, 电梯轿厢速度从零加速到最大速度 0.5 m/s, 负载功率、马达输入功率、回馈到电网的功率则分别增加到 7.8 kW、6.8 kW、1.6 kW。在轿厢匀速运行段, 三者的功率基本保持不变。在减速段, 上述三者功率分别减至 1.20 kW、0.85 kW、0.65 kW, 经过短暂的平层段后, 功率值都降为零。

电梯整个下行过程中马达的功率曲线、回馈到电网的功率曲线也都与负载需要的功率曲线相似。比较图 5a、5b 可知, 在电梯运行速度不变的情况下, 随着电梯载重质量的增加, 负载功率、液压马达输入功率及回馈到电网的功率也都有相应程度的

增加。

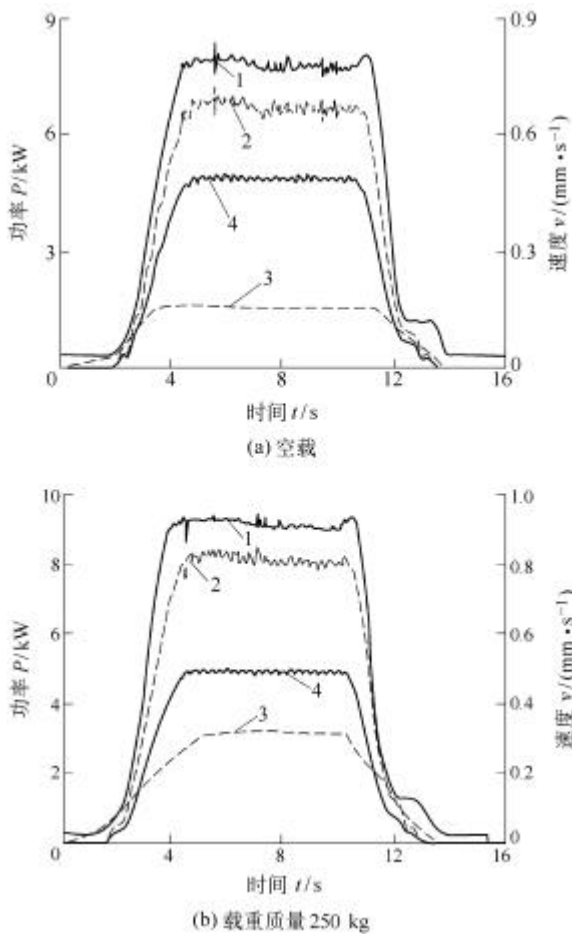


图5 电梯2-1楼运行的功率测试曲线

1. 负载功率 2. 液压马达输入功率
3. 回馈到电网的功率 4. 电梯轿厢速度

3 系统效率及节能性分析

3.1 系统的效率分析

为了考察系统的能量(各个环节功率对时间的积分)利用率,定义系统的输出能量与输入能量之比为系统的总运行效率。

对于上行工况为负载所需能量与电网输入能量的比值。对于下行工况为回馈到电网的能量与负载能量之比。

为了对比研究,以同样的试验电梯平台为控制对象,测试了阀控液压电梯在同样工况的功率消耗。由于阀控系统下行工况其电梯载重质量及轿厢势能转化为热能而完全损失掉,其下行效率为零。

从表1中可以看出变频驱动液压电梯系统上行的总效率平均约为44%,而普通的阀控液压电梯系统平均只有24%;变频驱动液压电梯下行平均约有30%的能量回馈回电网,而普通的阀控液压电梯系统下行的总效率为零。

表1 两种典型液压电梯系统总效率 %

动力系统	运行方向	电梯载重质量 m/kg		
		0	250	680
变频驱动液压电梯系统	上行	42	44	44
	下行	23	31	37
阀控液压电梯系统	上行	23	25	24

变频液压系统属于功率敏感系统,上行过程的输入功率始终与负载所需功率相适应,一层运行和多层运行工况的总效率几乎不变。而对于阀控系统来讲,短距离运行工况是最恶劣的,随着运行楼层数的增加,效率低的加速、减速段以及平层段占总的运行时间比例变小,其总运行效率会有增加,因此评价阀控电梯系统的运行效率是应该在特定条件下的。但其效率总不会超过变频液压电梯系统的效率。

对于变频驱动液压电梯下行工况,其能量回馈的效率随着电梯轿厢载重质量的增加而有所增加,原因是不同负载工况下,系统中间回路的能量损失相差不大,而重载情况下系统回路的能量损失在整个系统能耗中所占的比重变小,所以效率提高了。

3.2 系统节能性分析

变频驱动液压电梯系统的总效率高,说明系统对能量的利用率高,但不代表其消耗的绝对能量值小。变频系统与阀控系统的能量消耗特性存在差异(前者下行有能量回馈到电网),为了使不同的液压动力系统在不同工况下的能量损耗具有可比性,定义电梯上行/下行一次为一个工作循环周期,在这个周期内计算两种系统在不同工况下的能耗。由此可以定义节能比率 η_v ,来评价变频驱动液压电梯系统的节能效果

$$\eta_v = \frac{W_v - W_f}{W_f} = \frac{W_v - (W_{fu} - W_{fd})}{W_v} \quad (5)$$

式中 W_v —— 阀控液压电梯一个工作循环中电网输入能量

W_f —— 变频液压电梯一个工作循环中电网净输入能量

W_{fu} —— 变频液压电梯上行工况中电网输入能量

W_{fd} —— 变频液压电梯下行工况中回馈到电网的能量

由于变频驱动液压电梯与普通的阀控液压电梯相比,其“功率敏感”特性主要体现在电梯运行的加速段、减速及平层速度段。当电梯运行的楼层数增加时,匀速段(即最大速度段)的运行的时间比例也大幅度增加,变频驱动液压电梯和普通阀控液压

电梯之间的能耗差异开始减小。因此需要通过对比一层、两层乃至多层运行能耗,才能得出平均的节能比率。

从表2中可以看出,载重质量变化后,系统的节能比率基本不变;但电梯运行的楼层数(运行距离)增加后,系统的节能比率有所降低,试验测试系统总平均节能比率约为46.3%。由此可见变频驱动液压电梯系统比普通阀控液压电梯系统具有较高的节能效果。

表2 系统的节能比率 h_v %

运行的楼层	电梯载重质量 m/kg		
	0	250	680
1-2 楼和 2-1 楼	51	51	51
1-3 楼和 3-1 楼	41	42.1	41.4

节能比率是与运行楼层、运行高度相关的一个评价指标,因试验测试平台只有3个层站,因此得出平均节能比率也具有针对性。但这对于其他的变频驱动液压电梯系统还是有着很高的参考价值。

4 结论

(1) 变频驱动液压电梯系统的总效率远高于普通的阀控液压电梯系统。

(2) 对于同一个被控对象——液压电梯平台,在同样工况下变频驱动液压动力系统比普通的阀控液压动力系统节能效果显著。上述变频驱动液压动力系统的平均节能率达46.3%。

(3) 由于变频驱动液压电梯系统能量损失小,降低了液压电梯的油液温升,有助于提高液压电梯的速度控制性能。

(4) 变频驱动液压动力系统可推广应用到其他的工程机械的液压提升机构中,以降低系统的能量消耗。

参 考 文 献

- [1] TOMOICHIRO YAMAMUTO. Apparatus for controlling a hydraulic elevator. United States, 4593792[P]. 1986-06-10.
 [2] SHIMOAKOI M. VVVF - controlled hydraulic elevators[J]. Mitsubishi Electric Adance, 1992, 61(12): 13-15.

- [3] BERINGER A G. The frequency-controlled hydraulic drive[J]. Elevator World, 1998, 46(2): 94-96.
 [4] 陈钢. 变转速容积 - 比例复合控制电梯液压系统的设计和控制策略的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1995.
 [5] 张健民. VVVF 液压电梯速度控制系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1997.
 [6] 徐兵. 采用蓄能器的液压电梯变频节能控制系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
 [7] 徐兵 杨华勇. 变频驱动液压电梯控制系统综述[J]. 中国机械工程, 2001, 12(3): 1 082-1 086.
 [8] 韩安荣. 通用变频器及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

ENERGY CONSUMPTION CHARACTERISTICS OF VVVF CONTROLLED HYDRAULIC ELEVATORS

XU Bing ZHANG Bin LIN Jianjie

(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: VVVF-applied technique is the main developing direction of hydraulic elevators, and it provides an efficient way to reduce the large energy consumption of hydraulic elevators. The energy saving principle of VVVF controlled hydraulic elevators is studied. The experimental power consumption characteristics of elevator hydraulic circuits are obtained. Compared with the conventional valve controlled hydraulic elevator under the same working conditions, the VVVF controlled one has higher efficiency, lower energy consumption. VVVF technique also has a broad application to other vertically moved mechanism driven by hydraulic power.

Key words: VVVF drive Hydraulic elevators
Energy consumption

作者简介: 徐兵, 男, 1971年出生, 副教授。主要从事机电液传动及控制系统方面的研究。

E-mail: bxu@sfp.zju.edu.cn